

УДК 539.422.5

**А. А. Гришкевич, В. С. Вихренко, В. Н. Гаранин, А. Ф. Аникеенко**

Белорусский государственный технологический университет

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ АДАПТИВНОГО ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА  
ПО РАЗРАБОТАННОЙ 3D-МОДЕЛИ**

Данная работа выполняется в области исследований конструкций фрезерного инструмента с адаптивными свойствами на кафедре деревообрабатывающих станков и инструментов. Определение сил инерции подвижных частей инструмента на базе 2D-моделей, анализ которых был выполнен в предыдущих работах, не позволяет с высокой степенью достоверности определять параметры узлов инструмента, которые необходимо использовать при проектировании фрез с адаптивными свойствами.

В данной работе ставится задача разработать 3D-модель фрезерного инструмента и провести вычисления с использованием существующих программных пакетов. Для этого были изучены условия работы инструмента данного типа и определены наиболее опасные с точки зрения динамики режимы его эксплуатации. Анализ полученных данных является основным научным результатом проделанной работы.

Главным положительным результатом выполненной работы следует считать получение 3D-модели, которую можно использовать для инженерных расчетов при проектировании деталей и узлов инструмента с подвижными элементами.

**Ключевые слова:** фреза, адаптивный инструмент, наклон кромки, сила, анализ, поверхность.

**A. A. Grishkevich, V. S. Vikhrenko, V. N. Garanin, A. F. Anikeenko**

Belarusian State Technological University

**USING THE 3D-MODEL OF THE MILL WITH ADAPTIVE PROPERTIES  
FOR THE ANALYZER OF THE OPERATING CONDITIONS OF THE TOOL**

This research work is carried by the department of woodworking machines and tools in the direction of the design mills with adaptive properties. The problem of determining the inertial characteristics of a tool with moving parts based on 2D-models, the analysis of which was carried out in previous works, does not allow determine the parameters of the tool, which must be used during designing mills with adaptive properties.

The main tasks of this work which are carried out are present 3D-model of milling tool and to validate its performance using the existing software packages. In this way, the operating conditions tools of this type were studied and the most dangerous modes of its operation were identified from the point of view of dynamic. The analysis of the obtained data is the main scientific result of the work.

The main positive result of the work should be considered the creation of a workable design 3D-model, which can be used for design parts and components of tools with moving elements.

**Key words:** mill, adaptive tool, edge tilt, force, analysis, surface.

**Введение.** Механическая обработка древесины и древесных материалов занимает значимое место в добавочной стоимости продукции деревообработки. Сложность лезвийного резания обусловлена, в первую очередь, различными физико-механическими свойствами материалов, что затрудняет обеспечение стабильности установленного качества получаемых поверхностей, а также высокой удельной энергоемкостью процесса. Как результат – необходимость использования дорогостоящих машин, оборудования и инструментов, обеспечивающих эффективность и безопасность процесса при получении деталей из древесины и древесных материалов.

Проблема эксплуатации современного деревообрабатывающего оборудования (в том числе и инструмента) заключается в необоснованных режимах его эксплуатации, приводящих к уменьшению производительности про-

цесса и увеличению текущих материальных издержек. В данной работе внимание уделяется фрезерному дереворежущему инструменту, который широко используется на деревоперерабатывающих предприятиях. Получение при этом продукции установленного качества согласно нормативно-технической документации с одновременным снижением энергетических затрат является и сегодня насущным вопросом для научных исследований. С этой целью была разработана конструкция фрезы сборной, которая позволяет изменять положение ножа относительно оси вращения (угол наклона кромки  $\lambda$ ), передний и задний углы, технологический процесс (цилиндрическое или коническое фрезерование) [1].

Цель представленной работы – разработать расчетную 3D-модель для использования ее в инженерных расчетах при проектировании дета-

лей и узлов инструмента с подвижными элементами в адаптивных фрезерных инструментах.

Задачи работы:

1. Изучить существующую 2D-модель, используемую для расчетов фрезерного инструмента с адаптивными свойствами.

2. Определить инерционные характеристики инструмента с адаптивными свойствами при использовании разработанной 3D-модели.

3. Произвести расчеты и определить закономерности поведения инструмента с адаптивными свойствами.

4. Сделать соответствующие выводы по возможности применения представленной 3D-модели в инженерных расчетах.

Результатом работы будут разработанная 3D-модель для расчета инструмента, проведенные расчеты и сделанный их анализ.

**Основная часть.** Для частичного решения вышеобозначенных проблем при резании древесины и древесных материалов методом фрезерования разработана конструкция фрезы сборной, которая позволяет вести исследовательские работы благодаря возможности в конструкции инструмента изменять положение ножа относительно оси вращения (угол наклона кромки  $\lambda$ ), а также изменять передний и задние углы [1]. Рассматриваемая фреза (рис. 1) позволяет уменьшить составляющие силы резания, повысить период (полный период) стойкости инструмента, устранить сколы на обработанной поверхности.

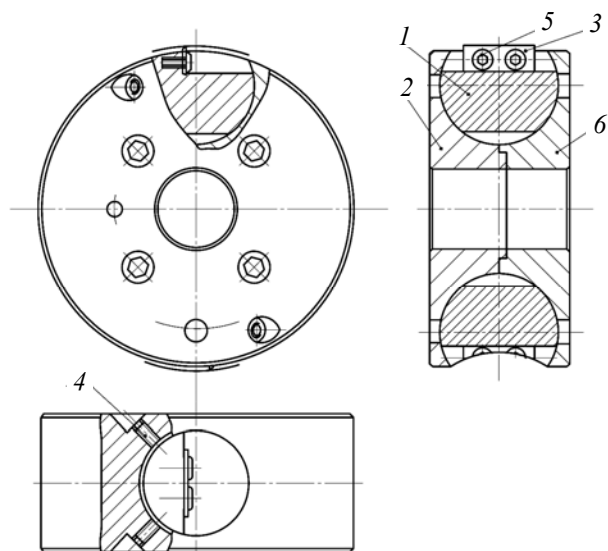


Рис. 1. Фреза сборная с адаптивными свойствами (изменяемыми углами)

1 – сегментный узел; 2, 6 – левая и правая части корпуса фрезы соответственно; 3 – нож;  
4 – винт для фиксации сегмента;  
5 – винт для фиксации ножа

Сегментный узел, на котором крепится нож при помощи винтов, является частью шара и

контактирует с корпусом по части сферической поверхности. Ввиду этого он имеет три вращательные степени свободы относительно корпуса фрезы, что обеспечивает широкие возможности по установке ориентации ножа как для целей научных исследований, так и при использовании в производстве с целью оптимизации процессов обработки заготовок.

Основная проблема при эксплуатации инструмента с подвижными элементами – это фиксация движущихся частей во время разгона, что было доказано в работе [2].

**Определение инерционных характеристик инструмента.** Для определения инерционных характеристик инструмента авторы воспользовались программным пакетом SolidWorks, где инструмент был начерчен в масштабе 1 : 1 (с указанием материала – сталь 40X). Были получены координаты центра тяжести сегмента и моменты инерции подвижной части инструмента. Результаты были представлены в следующем виде (рис. 2).

X = 0, Y = -0,68, Z = -3,36

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams\*<sup>2</sup>mm)

Taken at the center of mass.

I<sub>y</sub> = ( 0.98, -0.21, 0.00)    P<sub>y</sub> = 26112.07

I<sub>z</sub> = ( 0.00, 0.00, -1.00)    P<sub>z</sub> = 26956.43

I<sub>x</sub> = ( 0.21, 0.98, 0.00)    P<sub>x</sub> = 34689.64

Moments of inertia: (grams\*<sup>2</sup>mm)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

L<sub>yy</sub> = 26496.34    L<sub>yz</sub> = -1774.37    L<sub>yx</sub> = 0.11

L<sub>zy</sub> = -1774.37    L<sub>zz</sub> = 34305.38    L<sub>zx</sub> = -0.01

L<sub>xy</sub> = 0.11    L<sub>xz</sub> = -0.01    L<sub>xx</sub> = 26956.43

Moments of inertia: (grams\*<sup>2</sup>mm)

Taken at the output coordinate system.

I<sub>yy</sub> = 28468.77    I<sub>yz</sub> = -1303.12    I<sub>yx</sub> = 0.11

I<sub>zy</sub> = -1303.12    I<sub>zz</sub> = 34417.97    I<sub>zx</sub> = 0.00

I<sub>xy</sub> = 0.11    I<sub>xz</sub> = 0.00    I<sub>xx</sub> = 29041.46

Рис. 2. Данные характеристик модели

В дальнейшем полученные данные моментов инерции будем использовать с размерностью  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

**Разработка расчетной 3D-модели фрезерного инструмента с адаптивными свойствами.** На основании ранее выполненных расчетов сейчас предлагается использование в плоскости углов Эйлера с центром координат сетки, находящемся на оси вращения инструмента О. Предложенная модель позволяет определять реакцию связи корпуса инструмента с подвижным сектором и в дальнейшем изучать особенности взаимодействия адаптивного инструмента, изображенного на рис. 3, с обрабатываемым древесным материалом. Пространственную

схему распределения сил представим на рис. 4 (объемная иллюстрация) и в плоскости – рис. 5, которые отражают работу инструмента в холостом режиме (отсутствует процесс резания). В настоящей работе, и в том числе на рис. 4, не учтены составляющие силы резания:  $F_x$  – касательная составляющая силы резания;  $F_R$  – радиальная составляющая силы резания. Они будут также влиять на устойчивую работу подвижного элемента и их влияние будет учтено в дальнейших исследованиях.



Рис. 3. Натурный образец фрезы сборной с адаптивными свойствами

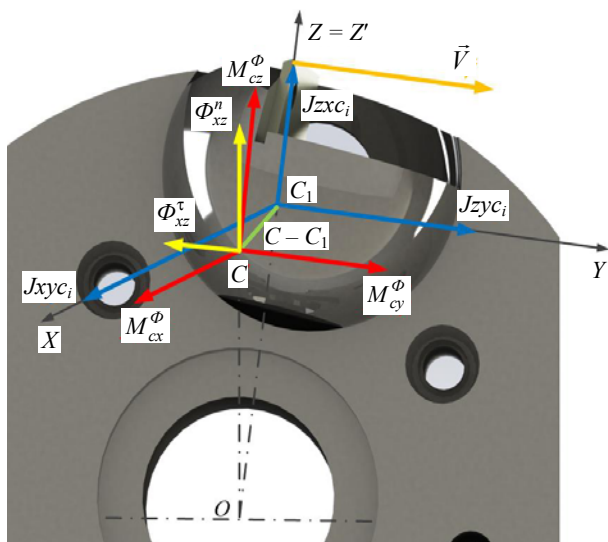


Рис. 4. Схема объемной иллюстрации подвижного элемента с указанием действующих сил на подвижный элемент в режиме разгона

Дальнейшие расчеты на основании представленной модели будем выполнять на основании [3]. На рис. 6 представим схему выполнения трех последовательных поворотов (углы Эйлера).

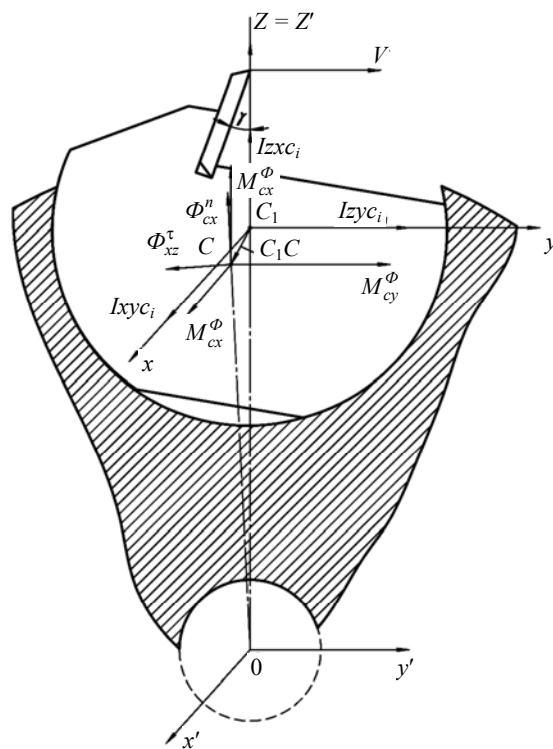


Рис. 5. Схема сил, действующих на подвижный элемент в режиме разгона в плоскости

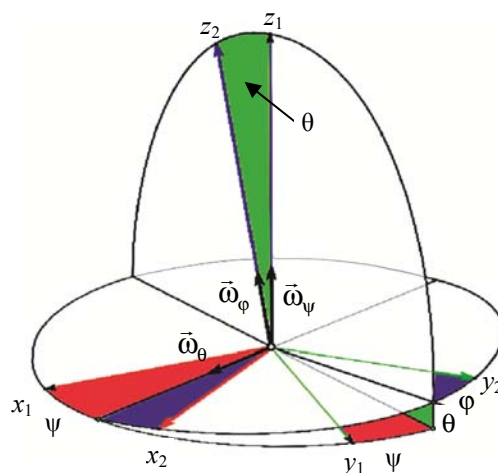


Рис. 6. Схема трех последовательных поворотов:  $\psi$  – угол прецессии;  $\theta$  – угол нутации;  $\phi$  – угол собственного вращения

Матрицы элементарных поворотов будут иметь вид

$$A_\psi = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix};$$

$$A_\phi = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Перемножая матрицы элементарных поворотов в обратном порядке, получим матрицу направляющих косинусов для сложного поворота:

$$A^{21} = A_{\varphi} \cdot A_{\theta} \cdot A_{\psi} = \begin{bmatrix} \cos\psi \cdot \cos\varphi - \sin\psi \cdot \cos\theta \cdot \sin\varphi & \sin\psi \cdot \cos\varphi + \cos\psi \cdot \cos\theta \cdot \sin\varphi & \sin\theta \cdot \sin\varphi \\ -\cos\psi \cdot \sin\varphi - \sin\psi \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi & -\sin\psi \cdot \sin\varphi + \cos\psi \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi & \sin\theta \cdot \cos\varphi \\ \sin\psi \cdot \sin\theta & -\cos\psi \cdot \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}.$$

На основании рис. 4 «старый» базис соотносится с сектором инструмента  $C_1xyz$ , а новый – с центром вращения инструмента  $Ox'y'z'$ .

Координаты центра тяжести сектора в «старом» базисе в матричном виде запишем, мм

$$x = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.68 \\ -3.36 \end{pmatrix} = \overline{CC_1}. \quad (1)$$

Координаты центра тяжести сектора в «новом» базисе запишем в следующем виде, мм:

$$x' = A^{-1} \cdot x + x'_0 \quad (2)$$

где  $x'_0 = A^{-1} \cdot x_0$ ;

$$x_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ OC_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 50 \end{pmatrix} - \text{координата «нового» базиса относительно «старого»}.$$

**Выполнение расчетов.** Дальнейшие расчеты будем выполнять с использованием программы MathCad. Зададимся следующими параметрами разгона фрезерного инструмента с целью изучения расчетной модели:

$\omega = 600 \text{ с}^{-1}$  – угловая скорость вращения инструмента;  $\varepsilon = 20 \text{ с}^{-2}$  – угловое ускорения инструмента в режиме разгона;  $m = 0,2 \text{ кг}$  – масса подвижной части инструмента;  $\varphi_0 = \theta_0 = \psi_0 = 0$  – углы в начальном положении.

Матрица угловых ускорений,  $\text{с}^{-1}$ :

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Значения для моментов инерции берем из расчета программой SolidWorks (данные представлены выше).

Составляем матрицу моментов инерции,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ :

$$I = \begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 28.46877 & -1.30312 & 0.00011 \\ -1.30312 & 34.41797 & 0 \\ 0.00011 & 0 & 29.04146 \end{pmatrix}$$

Касательная сила инерции, Н:

$$\Phi_{\tau} = m \cdot (\vec{\varepsilon} \times \vec{r}_c) \quad (4)$$

$$\Phi_{\tau} = \begin{pmatrix} \Phi_x^{\tau} \\ \Phi_y^{\tau} \\ \Phi_z^{\tau} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.187 \\ -2.72 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$|\Phi_{\tau}| = 0.187H.$$

Нормальная сила инерции, Н:

$$\Phi_n = m \cdot \omega^2 \cdot \vec{r}_c \quad (6)$$

$$\Phi_n = \begin{pmatrix} \Phi_x^n \\ \Phi_y^n \\ \Phi_z^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -48.96 \\ 3.358 \cdot 10^3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$|\Phi_n| = 3.358 \cdot 10^3 H.$$

Сила инерции относительно центра масс,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

$$I_c = A^T \cdot I \cdot A;$$

$$I_c = \begin{pmatrix} I_{xx}^c & I_{xy}^c & I_{xz}^c \\ I_{yx}^c & I_{yy}^c & I_{yz}^c \\ I_{zx}^c & I_{zy}^c & I_{zz}^c \end{pmatrix} = \quad (8)$$

$$= \begin{pmatrix} 29.041 & 1.1 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 1.1 \cdot 10^{-4} & 28.469 & -1.303 \\ 0 & -1.303 & 34.418 \end{pmatrix}$$

$$|I_c| = 2.841 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент силы инерции относительно центра масс в режиме разгона фрезы, Н·м:

$$\vec{M}_c^{\Phi} = \vec{I}_c \cdot \vec{\varepsilon} = \begin{pmatrix} I_{xx}^c & I_{xy}^c & I_{xz}^c \\ I_{yx}^c & I_{yy}^c & I_{yz}^c \\ I_{zx}^c & I_{zy}^c & I_{zz}^c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \varepsilon_z \end{pmatrix}$$

$$M_c^{\Phi} = \begin{pmatrix} M_{cx}^{\Phi} \\ M_{cy}^{\Phi} \\ M_{cz}^{\Phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 580.829 \\ 2.2 \cdot 10^{-3} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$|M_c^{\Phi}| = 580.829 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

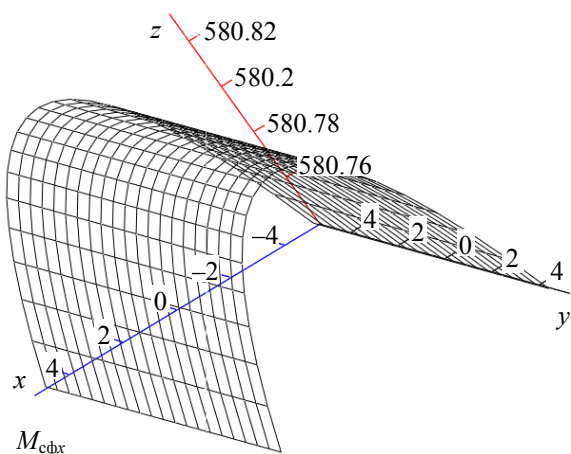


Рис. 7. График зависимости  $M_{cfx}$  (Н·м) от углов  $\psi$  и  $\theta$  (град)

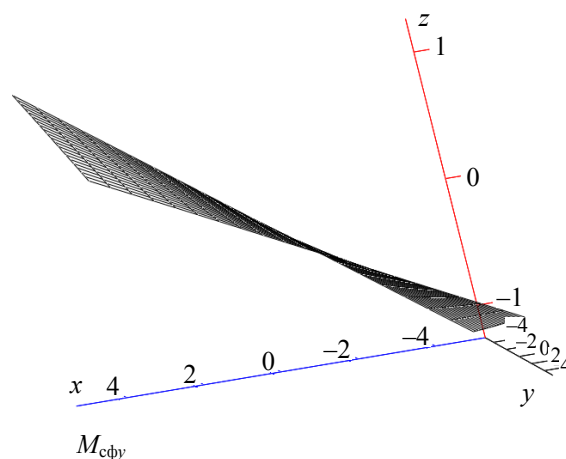


Рис. 9. График зависимости  $M_{cfy}$  (Н·м) от углов  $\psi$  и  $\theta$  (град)

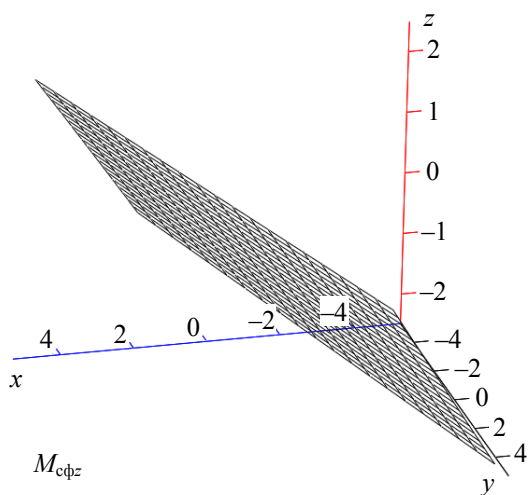


Рис. 8. График зависимости  $M_{cfz}$  (Н·м) от углов  $\psi$  и  $\theta$  (град)

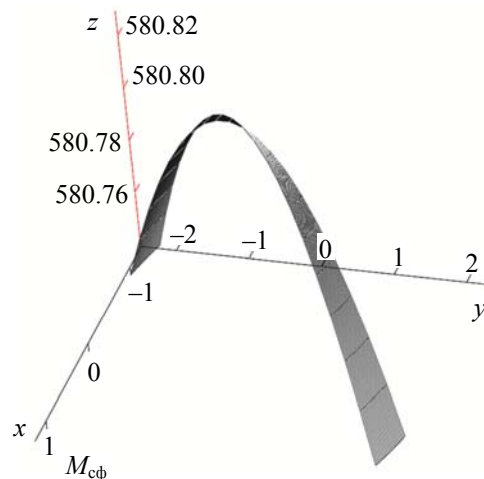


Рис. 10. График зависимости общего момента силы инерции от углов  $\psi$  и  $\theta$  (град)

**Анализ полученных данных.** Анализ данных выполним на основании графиков, полученных при расчете матриц в программном пакете MathCAD путем изменения углов  $\theta$  (относительно оси  $x$  – угол резания) и  $\psi$  (относительно оси  $z$  – угол в плане) в диапазоне  $0-90^\circ$  (угол  $\varphi = 0 = \text{const}$ ).

На рис. 7 приведен график зависимости  $M_{cfx}$  от углов  $\psi$  и  $\theta$ .

Максимальное значение момента силы инерции (ось  $z$ ) относительно оси  $x$  достигается при угле  $\theta = 0$ .

На рис. 8 приведен график зависимости  $M_{cfz}$  от углов  $\psi$  и  $\theta$ .

Момент силы инерции  $M_{cfz}$  (ось  $z$ ) увеличивается с увеличением угла  $\psi$  (ось  $x$ ) и не зависит от изменения угла  $\theta$  (ось  $y$ ). На рис. 9 приведен график зависимости  $M_{cfy}$  (Н·м) от углов  $\psi$  и  $\theta$  (град).

Момент силы инерции  $M_{cfy}$  (ось  $z$ ) увеличивается с ростом угла  $\theta$  (ось  $x$ ) и практически не зависит от изменения угла  $\psi$  (ось  $y$ ).

На рис. 10 приведен график зависимости  $M_{cfy}$  (Н·м) от углов  $\psi$  и  $\theta$ .

Как видно из графика, максимальный общий момент силы инерции (ось  $z$ ) достигается тогда, когда угол в плане  $\psi$  (ось  $y$ ) и угол резания  $\theta$  (ось  $x$ ) равны 0.

#### Заключение.

1. С целью более достоверного решения задачи по устойчивой работе ножа, жестко зафиксированного на подвижном держателе, следует рассматривать пространственную схему распределения сил.

2. Для определения сил, действующих на сегмент инструмента, разработана 3D-модель и для расчета сил введены углы Эйлера.

3. Проведены расчеты и определены составляющие силы инерции, действующие на нож и подвижный элемент фрезы (держатель ножа) с учетом углов Эйлера.

4. Анализируя графики, представленные программой MathCad, можно сделать вывод о том, что момент силы инерции меняет свое

значение при изменении углов в диапазоне от  $-4$  до  $4$  град. Максимальный момент силы инерции достигается при углах, равных  $0^\circ$ , он равен  $580,829 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

5. В дальнейших исследованиях следует учесть при расчетах касательную  $F_X$  и радиальную  $F_R$  составляющие силы резания и сделать анализ работы подвижного элемента фрезы.

### Литература

1. Гришкевич А. А., Аникеенко А. Ф., Гаранин В. Н. Особенности фрезерного сборного инструмента с изменяемыми углами: передним и наклона режущей кромки // Труды БГТУ. 2014. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 175–177.
2. Гришкевич А. А., Вихренко В. С., Гаранин В. Н., Аникеенко А. Ф. Адаптивный фрезерный инструмент и условие устойчивой его работы // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 275–280.
3. Мусхелишвили Н. И. Курс аналитической геометрии. М.: МГУ, 1967. 655 с.

### References

1. Grishkevich A. A., Anikeenko A. F., Garanin V. N. Features of the milling combined tool with changeable corners: to lobbies and an inclination of the cutting edge. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 175–177 (In Russian).
2. Grishkevich A. A., Vikhrenko V. S., Garanin V. N., Anikeenko A. F. Adaptive milling tool and condition of its stable operation. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 275–280 (In Russian).
3. Muskhelishvili N. I. *Kurs analiticheskoy geometrii* [Course of Analitical Geometry]. Moscow, MGU Publ., 1967. 655 p.

### Информация об авторах

**Гришкевич Александр Александрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

**Вихренко Вячеслав Степанович** – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической механики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: tm@belstu.by

**Гаранин Виктор Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: garanin@wmt.by

**Аникеенко Андрей Федорович** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: hasper@tut.by

### Information about the authors

**Grishkevich Aleksandr Aleksandrovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

**Vikhrenko Vyacheslav Stepanovich** – DSc (Physics and Mathematics), Professor, Professor, the Department of Theoretical Mechanics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tm@belstu.by

**Garanin Viktor Nikolaevich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: garanin@wmt.by

**Anikeenko Andrey Fedorovich** – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hasper@tut.by

Поступила 20.04.2017